

자기 광학적층을 갖는 광 도파로 아이솔레이터 제작을 위한 비가역적 위상변위에 대한 연구

양정수[†] · 김영일 · 변영태 · 우덕하 · 이 석 · 김선호

한국과학기술연구원 광기술 연구 센터

☎ 136-791 서울시 성북구 하월곡동 39-1번지

이종창

홍익대학교 전자전기공학부

☎ 121-791 서울시 마포구 상수동 72-1번지

(2002년 10월 17일 받음, 2003년 2월 7일 수정본 받음)

광 아이솔레이터의 제작을 위해 비가역적 위상변위 효과를 갖는 자기 광학물질을 클래딩 층으로 활용한 무한 평면 광도파로의 비가역적 위상변위 특성을 1.55 μm 파장에서 계산하였다. 본 연구에서 사용된 무한 평면 광 도파로의 구조는 클래딩 층으로 자기 광학 물질인 Ce:YIG와 LNB((LuNdBi)₃(FeAl)₅)₁₂)가 사용되었고, 각각의 고유 패러데이 회전 Θ_F 는 1.55 μm 파장에서 4500°/cm, 500°/cm이다. 가이드 층은 1.3Q와 InGaAs로 이루어진 다중 양자 우물 구조를 사용하였다. 클래딩 층을 지나 는 감쇄 전계에 따른 영향을 조사하기 위하여 기관의 굴절률이 InP와 공기의 굴절률을 갖는 경우에 대하여 도파 모드를 계산하였다. 여러 광 도파로 구조에서 비가역적 위상변위가 90°가 되는 위상 변위기의 크기가 최소가 되는 길이와 최적화된 가이드 층의 두께를 구하였다.

주제어 : optical isolator, magneto-optic layer, nonreciprocal phase shift, Faraday rotation.

I. 서 론

광 통신 시스템에서의 급격한 발전들은 여러 가지의 광 구성 요소들에 대한 높은 수준의 통합된(monolithic) 집적화를 필요로 하고 있으며, 이에 대한 많은 시도가 이루어지고 있다. 광 집적화를 이루기 위해서 광원으로 이용되는 반도체 레이저와 광 증폭기, 광 변조기등과 같은 광신호처리 소자들이 사용되고 있으며, 이들 소자들의 안정성을 위하여 광이 진행할 때 발생하는 불필요한 반사광들로부터 보호하기 위한 아이솔레이터(Isolator)들과 서큘레이터(Circulator)들의 필요성이 점점되고 있다. 이들 소자들은 집적화된 형태로 사용될 수 없는 광 구성 요소들로서, 엄밀하게는 체적 구성 요소들(bulk component)이라 할 수 있다. 그러므로 높은 수준의 집적화를 구현하기 위하여 집적화된 광 아이솔레이터는 필수적인 구성 요소라 할 수 있을 것이다. 또한, 이들은 완전한 광학적 하부구조(subsystem)의 집적화를 가능하게 할 수 있게 되어, 광 정보처리 시스템분야에 큰 영향을 미칠 수 있는 기술이 될 수 있을 것이다. 최근 이를 구현하기 위하여 광의 진행 방향에 따라 광학적 성질들이 변화하는 비가역적 효과(nonreciprocal effect)를 이용한 아이솔레이터, 서큘레이터등과 같은 소자들의 새로운 대안의 제시와 그 구현을 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 자기 광학적층을 갖는 광 도파로들에 외부 자기장을 가하는 경우 비가역적 위상변위(nonreciprocal phase shift)에

의한 광 아이솔레이터의 구현이 가능하다. 광통신에 사용되는 파장은 주로 1.3 μm 와 1.5 μm 에서 발달되어져 있다. 자기적 석류석 물질(magnetic garnet material)은 파장이 1.2 μm 와 5 μm 사이의 영역에서 낮은 광학적 손실을 가지므로 광통신용에 적합하다고 할 수 있을 것이며, 또한 큰 패러데이 회전(Faraday rotation)을 갖는다. 이 패러데이 회전은 비가역적 위상변위를 일으키는 기본적 요인이 된다. 그러므로 자기 광학적 층을 갖는 광 도파로에 사용될 수 있는 자기적 석류석 박막(magnetic garnet film)들은 광집적 아이솔레이터를 구현하기 위한 유일한 대안이라 할 수 있을 것이다. 최근에 비가역적 위상변위를 이용한 아이솔레이터와 서큘레이터등이 제시되고 있다.^[1-3] 본 연구에서는 서로 다른 패러데이 회전 값을 갖는 자기적 석류석 물질이 광 도파로에 클래딩 층으로 사용되는 경우와 기관의 굴절률이 다른 경우 무한 평면 광 도파로에서의 비가역적 위상변위에 대한 이론적인 연구를 하고자 한다.

II. 이 론

본 연구에서 해석하기 위한 광 도파로의 기본구조는 그림 1과 같다. 무한 평면 광 도파로에서 자기 광학적 층은 클래딩 층으로 사용되었고, 반도체 가이드 층의 두께는 d 이다. 광은 z 축 방향으로 진행한다. 외부 자기장을 y 축 방향으로 가해주는 경우 자화 M 은 광 도파로에 평행한 방향을 가지며, 광의 진행 방향에 수직하다. 광 도파로에 사용된 물질이 광학적 손실이 없는 물질들이라 가정한다면 광 도파로 층들의 상대 유전

[†]E-mail: jsyang@kist.re.kr

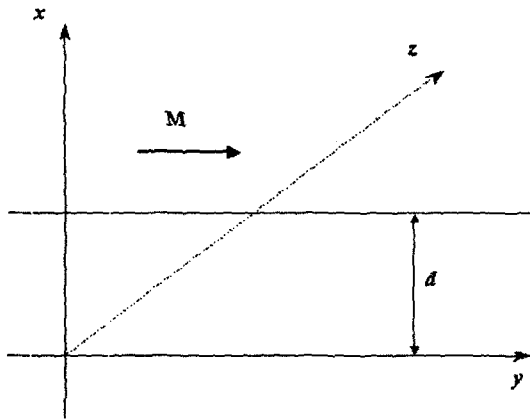


그림 1. 광 도파로의 기본구조.

을 텐서(relative permittivity tensor) $[\kappa]$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[\kappa] = [\kappa^0] + [\Delta\kappa] = \begin{pmatrix} \kappa(x) & 0 & 0 \\ 0 & \kappa(x) & 0 \\ 0 & 0 & \kappa(x) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & i\xi(x) \\ 0 & 0 & 0 \\ -i\xi(x) & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\kappa(x) = \begin{cases} n_c^2 & x > d \\ n_f^2 & 0 < x < d \\ n_s^2 & x < 0 \end{cases} \quad \xi(x) = \begin{cases} \xi & x > d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

여기서 $n_{c,f,s}$ 들은 각각 클래딩 층, 가이드 층, 기판을 나타내는 등방성 굴절률(isotropic refractive index)이고, 비대각선 요소(off-diagonal element) ξ 는 자기 광학적 효과를 나타낸다. ξ 를 고스패라데이 회전(specific Faraday rotation) Θ_F 와 자유공간에서의 파수(wave number) k_0 로 표시하면 $\xi = 2n\Theta_F/k_0$ 과 같다. 맥스웰 방정식을 이용하여 TE 모드와 TM 모드를 계산하면 TM 모드만이 비가역적 효과를 일으키는 진행 상수 β 의 선형 항을 가지게 되어 비가역적 효과를 갖게 되며, TE 모드는 가역적이다. 따라서, TM 모드에서의 자기장을 $H = [0, h_y(x), 0] \exp(i(\alpha x - \beta z))$ 으로 나타낼 때, 섭동론을^[6] 이용한 비가역적 위상변위는 (3)식으로 표현할 수 있다.

$$|\Delta\beta| = |\beta_{forward} - \beta_{backward}| = \frac{\int |h_y(x)|^2 \partial_x \left(\frac{\xi(x)}{\kappa(x)^2} \right) dx}{\int \frac{1}{\kappa(x)} |h_y(x)|^2 dx} \quad (3)$$

여기서 $\beta_{forward}$ 는 전향 전파상수(forward propagation constant)를 나타내며, $\beta_{backward}$ 는 후향 전파상수(backward propagation constant)를 나타낸다. $\xi(x)$ 는 x 축에 대하여 부분적인 상수 함수이므로 델타 함수의 특성을 갖게 되어 (3)식의 계산을 수행하면 (4)식으로 표현된다.

$$|\Delta\beta| = \frac{\xi}{n_c} \frac{|h_y(d)|^2}{\int \frac{1}{\kappa(x)} |h_y(x)|^2 dx} \quad (4)$$

III. 결과 및 논의

광원으로 쓰일 반도체 레이저와 간섭형 광 아이솔레이터를 단일 기판위에 집적 시킬 목적으로 비가역적 위상변위를 계산한 광도파로의 Epi. 구조는 그림 2와 같다. 기판은 InP를 사용하였고, 가이드 층은 1.3Q층과 InGaAs 층으로 이루어진 다중양자우물구조를 갖는다. 클래딩 층은 패러데이 회전값에 따른 비가역적 위상 변위를 비교하기 위하여 Ce이 치환된 YIG(yttrium iron garnet)인 Ce:YIG와 LNB((LuNdBi)₃(FeAl)₅)₁₂)를 사용하였다. 계산에 사용된 1.55 μm 에서의 각 층의 굴절률은 표 1과 같다. 다중 양자우물 구조를 갖는 가이드 층의 평균 굴절률을 계산하기 위하여 InGaAs의 굴절률과 1.3Q의 굴절률을 각 층의 두께를 고려한 평균 굴절률 $n_{ave} = 3.425$ 를 사용하였다. 자성 물질의 자기 광학적 효과에 대한 영향을 조사하기 위하여, 클래딩 층으로 사용된 물질은 각각 Ce:YIG와 LNB이다. Ce:YIG^[7]와 LNB^[8] 각각의 패러데이 회전 Θ_F 는 4500°/cm, 500°/cm이므로 자기 광학적 효과를 나타내는 항 ξ 는 $\xi_{Ce:YIG} = 0.0086$, $\xi_{LNB} = 0.001$ 값을 갖는다. 기판이 InP인 경우의 계산된 비가역적 위상 변위는 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 비가역적 위상변위가 최대가 되는 가이드 층의 두께는 $d = 0.37 \mu\text{m}$ 이었고, 이 때 해당되는 비가역적 위상변위의 값은 각각 $|\Delta\beta_{InP}^{Ce:YIG}| = 0.385 \text{ mm}^{-1}$, $|\Delta\beta_{InP}^{LNB}| = 0.045 \text{ mm}^{-1}$ 이다. $|\Delta\beta|$ 의 값은 ξ 에 비례하고 굴절률 n^4 에 반비례한다. 두 자성 물질들의 굴절률의 차가 크지 않으므로, 비가역적 위상변위의 값은 주로 ξ 에 관한 의존성을 가지게 될 것이다. $|\Delta\beta_{InP}^{Ce:YIG}| / |\Delta\beta_{InP}^{LNB}| \approx 8.6$ 의 값을 가지며, $\xi_{Ce:YIG} / \xi_{LNB} = 8.6$ 의 값을 가지므로 예상된 결과와 잘 일치한다고 볼 수 있다. 또한 클래딩 층을 지나가는 감쇄전계(evanescent field)가 클수록 자기 광학적 효과를 많이 받게 될 것이므로, 그에 따른 비가역적 위상변위가 크게 나타날 것이다. 그에 따른 영향을 알아보기 위하여 기판의 굴절률을 공기의 굴절률로 대체하여 구한 비가역적 위상변위를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 비가역적 위상변위가 최대가 되는 가이드 층의 두께는 $d = 0.22 \mu\text{m}$ 이다. 이 두께에 해당하는 비가역적 위상 변위 값은 $|\Delta\beta_{Air}^{Ce:YIG}| = 7.107 \text{ mm}^{-1}$, $|\Delta\beta_{Air}^{LNB}| = 0.767 \text{ mm}^{-1}$ 이다. 기판이 InP인 경우에 비해 17~18배 더 큰 값을 갖는다. 그림 3과 그림 4의 비가역적 위상변위의 계산은 클래딩 층이

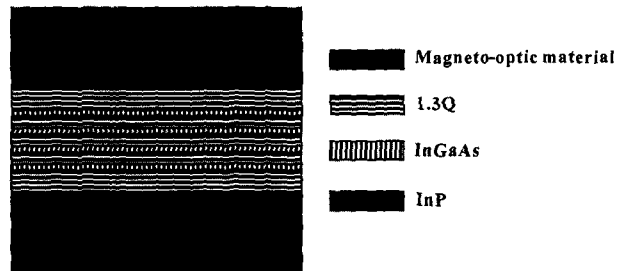


그림 2. 다중양자우물 구조를 가이드 층으로 갖는 광 도파로 구조.

표 1. 계산에서 사용된 1.55 μm 에서 각 층의 굴절률

층 구성물질	InP	InGaAs	1.3Q	LNB	Ce:YIG
굴절률	3.17	3.54	3.415	2.26	2.22

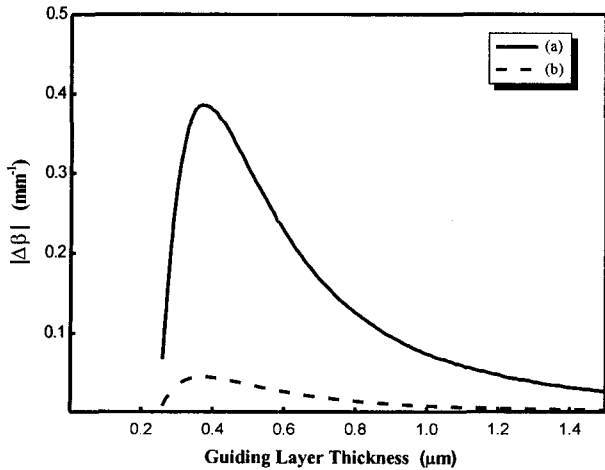


그림 3. $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 에서 TM_0 mode에 대한 계산된 비가역적 위상 변위(MQW: 다중양자우물). (a) Ce:YIG/MQW/InP 무한 평면 도파로, (b) LNB/MQW/InP 무한 평면 도파로.

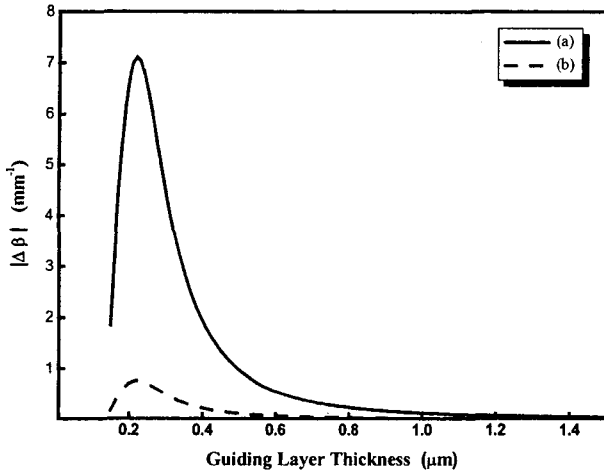


그림 4. $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 에서 TM_0 mode에 대한 계산된 비가역적 위상 변위(MQW: 다중양자우물). (a) Ce:YIG/MQW/Air 무한 평면 도파로, (b) LNB/MQW/Air 무한 평면 도파로.

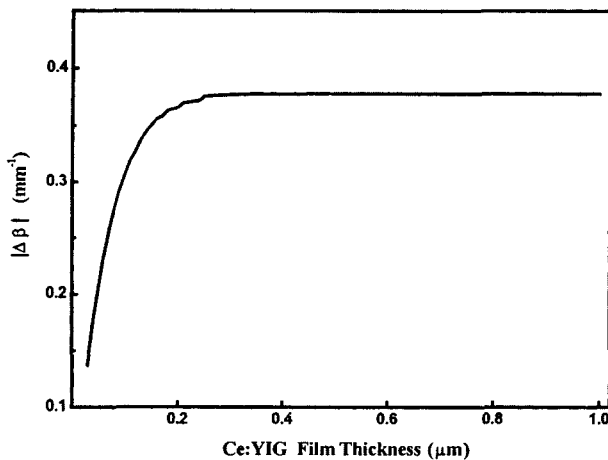


그림 5. GGG/Ce:YIG/MQW/InP구조에서 가이드 층의 두께가 $0.37 \mu\text{m}$ 일때 자성 박막의 두께에 대해 계산된 비가역적 위상 변위(MQW: 다중양자우물).

표 2. 각 구조에서의 L_{NRPS}

광 도파로 구조	Ce:YIG/MQW/Air	Ce:YIG/MQW/InP	LNB/MQW/Air	LNB/MQW/InP
L_{NRPS} (mm)	0.22	4.08	2.05	34.9

무한한 두께를 갖는 경우에 대하여 이루어졌다. 그러므로, 클래딩 층으로 이용된 자성 박막의 두께에 따른 비가역적 위상 변위를 구하여 무한한 두께를 갖는 경우의 비가역적 위상 변위와 같은 크기를 갖는 두께를 구하여야 한다. 가이드 층의 두께가 $0.37 \mu\text{m}$ 일때, 자성 박막의 두께에 대한 비가역적 위상 변위를 그림 5에 나타내었다. 자성 박막을 성장시킬 기관은 GGG($\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$)이고 굴절률은 1.95를 사용하였다. 그림 5로부터 자성 박막의 두께가 $0.4 \mu\text{m}$ 이상에서는 자성 박막의 두께가 무한한 경우에 대해 계산된 비가역적 위상 변위와 거의 같은 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 간섭계 형태의 광 도파로 아이솔레이터를 제작하기 위해서는 반사되는 광의 위상차가 180° 가 되어야 아이솔레이터로서의 작동을 할 수 있고, 비가역적 위상 변위가 90° 가 되는 위상 변위기의 크기는 $L_{NRPS} = \frac{\pi}{2|\Delta\beta|}$ 식으로부터 구할 수 있다. 각 구조에서의 계산된 변위기의 최소 크기는 표 2에 나타내었다.

IV. 결 론

광 집적 시스템에서 요구하는 광 집적 소자제작을 위해 자성 박막을 클래딩 층으로 사용하였다. 자기 광학적 특성을 이용한 광 집적 아이솔레이터의 제작을 위해 무한 평면 광 도파로에서 비가역적 위상 변위에 대한 계산을 수행하였다. 클래딩 층으로 비가역적 위상 변위를 일으키는 기본적인 요인이 되는 패러데이 회전 θ_F 이 다른 Ce:YIG와 LNB를 사용하였고, 감쇄 전계의 영향을 알기 위하여 기관의 굴절률을 변화 시켰다. 비가역적 위상 변위가 90° 가 되는 L_{NRPS} 의 최소 길이는 Ce:YIG/MQW/Air, Ce:YIG/MQW/InP, LNB/MQW/Air, LNB/MQW/InP 구조를 갖는 광 도파로에 대하여 각각 0.22 mm, 4.08 mm, 2.05 mm, 34.9 mm의 비가역적 위상 변위기의 길이를 갖는다. 그러므로 간섭계 형태의 광 아이솔레이터 제작시 수백 마이크로 미터 크기의 광 집적 아이솔레이터의 제작이 가능함을 알 수 있다.

참고문헌

- [1] T. Mizumoto, H. Chihara, N. Tokui, and Y. Naito, "VERIFICATION OF WAVEGUIDE-TYPE OPTICAL CIRCULATOR OPERATION," *Electron. Lett.*, vol. 26, no. 3, pp. 199-200, 1990.
- [2] A. F. Popkov, M. Fehndrich, M. Lohmeyer, and H. Dötsch, "Nonreciprocal TE-mode phase shift by domain walls in magneto-optic rib waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 72, no. 20, pp. 2508-2510, 1998.
- [3] N. Bahlmann, V. Chandrasekhara, A. Erdmann, R. Gerhardt, P. Hertel, R. Lehmann, D. Salz, F. Schröteler, M. Wallenhorst, and H. Dötsch, "Improved Design of Magneto-optic Rib Waveguides for Optical Isolators," *J. Lightwave Tech.*

- nol*, vol. 16, no. 5, pp. 818-823, 1998.
- [4] H. Yokoi and T. Mizumoto, "Proposed configuration of integrated optical isolator employing wafer-direct bonding technique," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 21, pp. 1787-1788, 1997.
- [5] J. Fujita, M. Levy, R. M. Osgood, Jr, L. Wilkens and H. Dötsch, "Waveguide optical isolator based on Mach-Zehnder interferometer," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 76, no. 16, pp. 2158-2160, 2000.
- [6] S. Yamamoto and T. Makimoto, "Thin-film optical waveguides and design of nonreciprocal devices for integrated optics," *J. Appl. Phys.* vol. 45, no. 2, pp. 882-888, 1974.
- [7] T. Shintaku, and T. Uno, "Optical waveguide isolator based on nonreciprocal radiation," *J. Appl. Phys.*, vol. 76, no. 12, pp. 8155-8159, 1994.
- [8] T. Mizumoto, S. Mashimo, T. Ida, and Y. Naito, "In-plane magnetized rare earth iron garnet for a waveguide optical isolator employing nonreciprocal phase shift," *IEEE. Trans. Magn.*, vol. 29, no. 6, pp. 3417-3419, 1993.

Investigation of a nonreciprocal phase shift properties of optical waveguide isolators with a magneto-optic layer

Jeong Su Yang[†], Young-Il Kim, Young Tae Byun, Deok Ha Woo, Seok Lee, and Sun Ho Kim

Photonics Research Center, Korea Institute of Science and Technology, Seoul, KOREA

[†]E-mail: jsyang@kist.re.kr

Jong Chang Yi

School of EE Hong-Ik University, Seoul, KOREA

(Received October 17, 2002, Revised manuscript February 7, 2003)

The nonreciprocal phase shift characteristics of infinite slab optical waveguides with magneto-optic materials in the cladding layer was calculated at 1.55 μm for optical isolators. The infinite slab waveguide structures considered in this paper were as follows. The magneto-optic materials used as a cladding layer were Ce:YIG and LNB((LuNdBi)₃(FeAl)₅)₁₂. Their specific Faraday rotations Θ_F are 4500°/cm, 500°/cm at wavelength 1.55 μm respectively. The guiding layer with multi-quantum well structure was used, and it consists of 1.3Q and InGaAs. In order to investigate the effect of evanescent field penetrating the cladding layer, guiding mode characteristics were calculated for the cases when the substrate is InP and air. We calculated the minimum lengths of 90° nonreciprocal phase shifters and their optimum guiding layer thicknesses in various optical waveguide structures.

OCIS Code : 160.382.